

пика плавления, соответствующих плавлению эвтектики Al-Ge и пику плавления первичного алюминия.

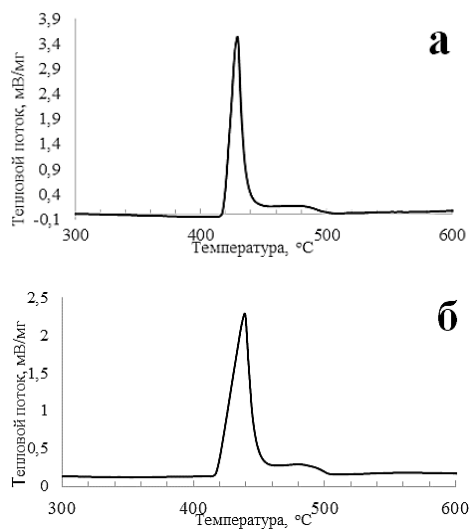


Рисунок 3 – Термограммы плавления сплавов системы Al-24 ат. % Ge

Зависимость микротвердости фольги сплавов системы Al-Ge от концентрации Ge представлены на рис. 4. Рост микротвердости обусловлен повышением концентрации фазы германия, имеющей высокую твердость.

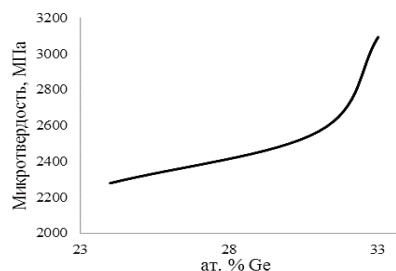


Рисунок 4 – Микротвердость сплавов систем Al-Ge

Таким образом, выявлено, что сверхбыстрая закалка из расплава приводит к сужению температурного интервала плавления в 3 раза для околоэвтектических сплавов системы Al-Ge.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф18МВ-005).

Литература

1. Nakagawa, Keiyu Microstructure Changes of Al-Ge Alloys with Repeated Loading / Keiyu Nakagawa, Teruto Kanadani, Goroh Itoh // *Materia Japan*. – 2003. – V. 42. – P. 855–855.
2. Гусакова, О.В Распад пересыщенного твердого раствора в быстрозатвердевших фольгах сплавов системы олово-кадмий / О.В. Гусакова, В.Г. Шепелевич // *Физика металлов и металловедение*. – 2014. – Т. 115, № 2. – С. 143–148.

УДК. 539.216; 539.22

ЗЕРЕННАЯ СТРУКТУРА БЕССВИНЦОВЫХ ПРИПОЕВ НА ОСНОВЕ ФОЛЬГИ Sn-Zn-Ga Гусакова О.В.¹, Шепелевич В.Г.², Гусакова С.В.²

¹Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова БГУ,
Минск, Республика Беларусь,

²Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Увеличение количество исследований, посвященных материалам для пайки, обусловлено переходом промышленности на бессвинцовую пайку. Практически все материалы для бессвинцовых припоев являются сплавами на основе олова [1]. Особое внимание уделяется исследованию зеренной структуры паяных соединений, получаемых при пайке сплавами олова. Было установлено, что при использовании чистого олова паяное соединение состоит из одного-двух зерен [2], что приводит к отрицательному влиянию на его механические свойства: наблюдаются неоднородность распределения напряжения, растрескивание, рост усов [3]. Показано, что в микронных каплях припоев на основе сплавов Sn-Ag и Sn-Ag-Cu затвердевание протекает с образованием зерна с несколькими двойниками [4]. В связи с этим актуальным является исследование зеренной структуры микронных слоев сплавов на основе

эвтектики Sn-Zn, обладающей хорошими механическими свойствами.

Фольга толщиной в несколько десятков микрон получалась методом сверхбыстрой закалки из расплава в результате затвердевания тонкого слоя расплава после его растекания по поверхности вращающегося кристаллизатора. Исследованы зеренная структура фольги олова и сплавов Sn-Zn эвтектического и околоэвтектического составов легированных Ga. Методом дифракции обратно отраженных электронов проводились исследования зеренной структуры у стороны фольги, прилегающей к кристаллизатору.

На рис. 1 приведена зеренная структура чистого олова (а) и схема окраски зерен в зависимости от их ориентации (б).

Фольга чистого олова отличается образованием крупных вытянутых зерен шириной до 100 мкм, их длина достигает 500 мкм. Зерна не имеют

преимущественной ориентации друг относительно друга. На рис. 2 представлены угловые разориентации соседних зерен (1) и случайно выбранных зерен (2). Тонкая линия соответствует теоретической кривой разориентации зерен при отсутствии корреляции в их взаимной ориентации. Наблюдаемый максимум в области низких углов обусловлен большим количеством малоугловых границ зерен, которые являются соседними в пределах одного зерна.

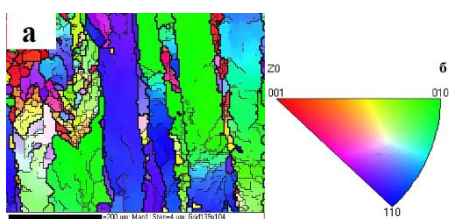


Рисунок 1 – Зеренная структура (а) и схема окраски зерен фольги Sn в слое, прилегающем к кристаллизатору

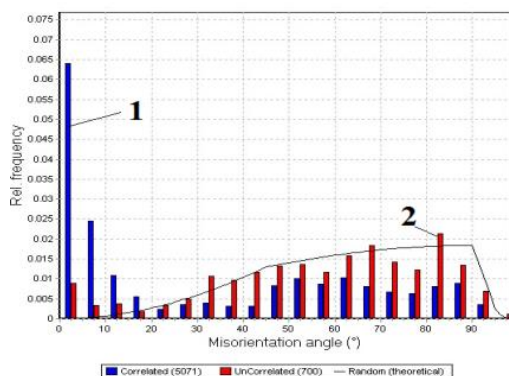
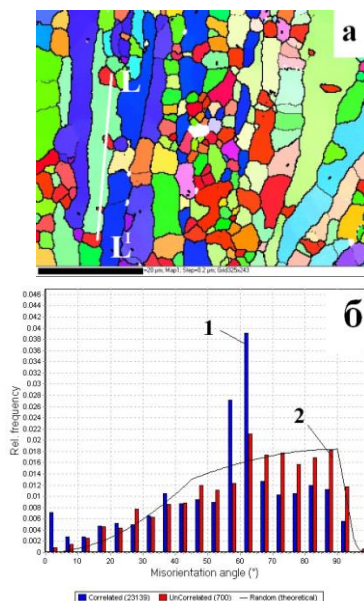


Рисунок 2 – Диаграмма разориентации зерен в фольге чистого олова

На рис. 3 приведены зеренная структура сплава Sn – 5 ат. % Zn и диаграмма разориентации зерен. Подобно чистому олову в сплаве Sn-Zn наблюдается образование вытянутых зерен. Однако их размер на порядок меньше чем в олове. Особенностью разориентации соседних зерен (1) является появление на пиков в области 60 градусов.

В длинном вытянутом зерне присутствуют последовательно расположенные участки, повернутые относительно основного зерна на углы 58 и 62 градуса. Такая разориентация соответствует образованию двойников с плоскостями скольжения $\{101\}$ и $\{301\}$ и направлением скольжения $[100]$. Углы двойникования равны 57,2 градуса и 62,8 градуса, соответственно. Таким образом, в фольге Sn – Zn в процессе затвердевания реализуется механизм двойного циклического двойникования. Подобные характеристики зеренной структуры сохраняются для быстрозатвердевшей

фольги сплавов системы Sn-Zn с повышением концентрации цинка до (12,0 ат. %).



Риснок 2 –Зеренная структура (а) и разориентация зерен в фольге сплава Sn – 5 ат. % Zn

На рис. 3 приведены углы между зернами, которые пересекает линия $L - L^I$.

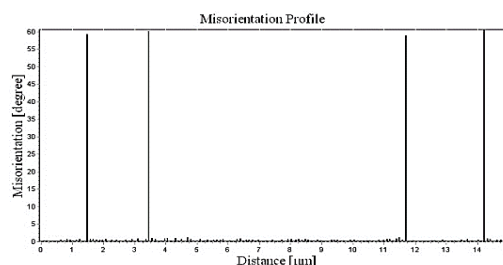


Рисунок 4 – Профиль разориентации углов зерен вдоль линии $L - L^I$

Ранее было показано [5], что в фольге Sn в зернах наблюдается поворот ориентации в пределах одного зерна, который может быть обусловлен вращением субзер в направлении легкого скольжения, что обеспечивает релаксацию напряжений, вызванную движением верхних слоев расплава. Можно предположить, что легирование олова цинком приводит к увеличению числа зародышей зерен и уменьшает пластичность олова. В результате релаксация напряжений в длинных зернах происходит не за счет движения дислокаций, а путем двойникования.

Для того чтобы способствовать образованию большего количества зародышей зерен околоэвтектический сплав Sn – 12 ат. % Zn был легирован Ga. Зеренная структура фольги сплава Sn – 12 ат. % Zn – 1 ат.% Ga приведена на рис.5.

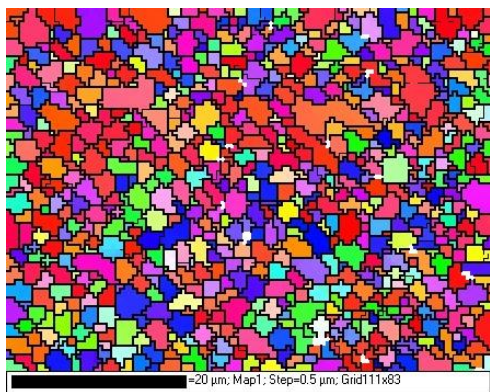


Рисунок 5 – Зеренная структура фольги сплава Sn – 12 ат. % Zn – 1 ат.% Ga

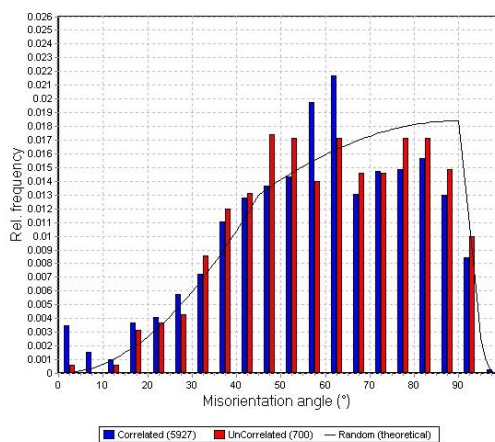


Рисунок 6 – Диаграмма распределения зерен в фольге сплава Sn – 12 ат. % Zn – 1 ат.% Ga

Легирование сплава Sn – Zn галлием приводит к уменьшению размеров зерен. Средний размер зерна составляет 18 мкм. Форма зерен близка к равноосной – среднее отношение длины зерна к его ширине равно 1,2. На рис. 6 приведена диаграмма распределения зерен в фольге сплава Sn – 12 ат. % Zn – 1 ат.% Ga, которая показывает отсутствие корреляции как в соседних, так и в случайно выбранных зернах.

Таким образом, легирование сплава Sn-Zn галлием приводит к измельчению зерна, образованию равноосных зерен и подавляет двойникование при росте зерна.

Литература

- 1.Cheng, Shunfeng A review of lead-free solders for electronics applications / Shunfeng Cheng, Chien-Ming Huang, Michael Pecht // Microelectronics Reliability. – 2017. – Vol. 75. – P. 77–95.
- 2.Ma, Z.L. Nucleation and twinning in tin droplet solidification on single crystal intermetallic compounds / Z.L. Ma, J.W. Xian, S.A. Belyakov, C.M. Gourlay // Acta Materialia. 2018. – Vol. 150. – P. 281–294.
- 3.Sun, Menglong Growth behavior of tin whisker on SnAg microbump under compressive stress / Menglong Sun, Mengya Dong, Dongfan Wang, Huiqin Ling, An-min Hu, MingLi // Scripta Materialia. – 2018. – Vol. 147. – P 114–118.
- 4.Lehman, L.P. Cyclic twin nucleation in tin-based solder alloys / L.P. Lehman, Y. Xing, T.R. Bieler, E.J. Cotts // Acta Materialia 58 (2010) 3546–3556.
5. Gusakova, O., Shepelevich, V. The influence of melt flow on grain structure of tin and its alloys produced by ultrafast quenching from the melt / O. Gusakova, V. Shepelevich // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 192 (2017) 012015-1-6.

УДК 620.179.14

О ПРОБЛЕМЕ ИЗМЕРЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТЕЛ Гусев А.П.¹, Зацепин Е.Н.²

¹Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Основной характеристикой средств измерений, как известно, является точность измерений, которая закладывается на стадии их проектирования в зависимости от используемого принципа измерений и уровня развития техники в области средств измерений. Однако достижение наивысшей точности измерений не является гарантией достоверности результатов, в особенности – их интерпретации, получаемых, например, при наличии методической ошибки измерений, либо при наличии не учтенных факторов исследуемого физического явления. Последнее является основанием представления данной работы, содержание которой связано с проблемой измерений намагниченности ферромагнитных тел.

Известно, что измерения магнитных характеристик ферромагнитных материалов, например – магнитного гистерезиса, производят в замкнутой магнитной цепи, эквивалентом которой является также ограниченное в диаметре бесконечно длинное тело. Магнитный поток намагниченности материала в этом случае практически весь сосредоточен в магнитопроводе, то есть не рассеивается в окружающее пространство и точность измерения интенсивности магнитного потока ограничивается лишь погрешностью используемого метода и аппаратуры.

В практике магнитных измерений подобные случаи единичны, подавляющее же число измерений проводятся с намагничиванием тел огра-